

## Continuous distribution analysis를 이용한 냉·해동과정 중 돈육의 NMR relaxation pattern의 변화

이선민 · 노정해\* · 윤혜현<sup>1</sup> · 이택수<sup>2</sup>

한국식품개발연구원, <sup>1</sup>경희대학교 조리과학과, <sup>2</sup>서울여자대학교 식품·미생물공학과

## Changes of NMR Relaxation Pattern of Pork Loins during Freezing and Thawing Using Continuous Distribution Analysis

Sun-Min Lee, Jeong-Hae Rho\*, Hye-Hyun Yoon<sup>1</sup> and Taek-Soo Lee<sup>2</sup>

Korea Food Research Institute

<sup>1</sup>Department of Culinary Science and Art, Kyung Hee University

<sup>2</sup>Department of Food and Microbial Technology, Seoul Women's University

Variations in NMR relaxation time during freezing and thawing processes in pork loins were investigated. Continuous distribution analysis of data obtained from T<sub>2</sub> CPMG were carried out to observe the changes in water content in the muscles. Solid fat content slightly increased with decreasing temperature, then showed sharp increase at -4°C, reaching 85% at -25°C. Relaxation time decreased with decreasing temperature, suggesting that ice crystals gradually formed at freezing temperature. T<sub>2</sub> relaxation time during thawing was higher than that during freezing, suggesting that ice crystals melted by thawing and resulted in water loss from meat. Continuous distribution analysis of data obtained from Carr-Purcell-Meiboom-Gill experiments shows one to four components on the spectra during freezing and thawing processes. The area of major components between 30 to 45 ms decreased with decreasing temperature, and were not detected below -4°C, below which only T<sub>1</sub> signal was detected. The area of T<sub>1</sub> decreased with decreasing temperature. Between -4 to 10°C, the areas of T<sub>m</sub> and T<sub>1</sub> during thawing were larger than those during freezing. These results suggest that the exchange between bound water and free water takes place during freezing and thawing.

**Key words:** low-field NMR, relaxation time, freezing, thawing, continuous distribution analysis

### 서 론

국민소득의 증가와 식생활 패턴의 변화로 1998년 이후 쇠고기와 돼지고기의 수입량은 계속적으로 증가되고 있는 실정이다. 2000년 4월 구제역 발생 이후 채식위주 식단의 유행으로 잠시 주춤하던 쇠고기와 돼지고기의 수입량은 2002년 3월 누적 수입량이 지난해 같은 기간수입량의 약 170%에 달하고 있어 앞으로 수입되는 쇠고기와 돼지고기가 크게 증가될 것으로 예상된다<sup>(1)</sup>. 그러나 일부의 수입쇠고기는 지육 냉동 상태로 들어와서 해동 후 뼈를 제거하고 부분육으로 재포장하여 냉동 유통되기 때문에, 여러 차례의 냉동과 해동의 과정을 거치게 되어 육즙상실로 인한 식감의 저하를

가져올 수 있다. 냉동 후 해동된 고기와 신선육은 지방, 단백질, 물 등의 화학적 성분 함량만으로는 아무런 차이가 없기 때문에 다른 분석방법으로는 둘을 구별하기가 매우 까다롭다. 일단 냉동이 되면 근육 내부에서 얼음 결정이 형성되고 그 후 삼투현상에 의해 세포 밖으로 물이 빠져나가게 되며, 이에 기인하여 단백질의 변성이 일어나는 등의 품질 변화가 일어나게 된다. 또한 해동 후에는 중저온균의 발육이 매우 용이하게 되어 미생물학적 품질 저하를 가능하게 할 수 있기 때문에 유럽 등에서는 일단 냉동된 식육은 해동하지 못하도록 법으로 규제하고 있다. 따라서 해동 후 식육의 품질 평가를 위한 정확하고 신속한 측정 방법의 개발이 시급하다<sup>(2)</sup>. 냉동과 해동시에는 근육 내에서의 물의 구경의 변화가 발생할 수 있으며, 그 변화는 Carr-Purcell-Meiboom-Gill method(CPMG)에 의한 multi-exponent analysis에 의해 측정이 가능하리라 여겨지므로 이를 이용한 냉동과 해동 중의 고기를 비교 검토하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

냉·해동 중의 식육의 품질변화에 관한 연구는 냉동·해동의 반복이 쇠고기의 물성에 미치는 영향<sup>(3)</sup>과 동결, 냉동냉

\*Corresponding author: Jeong-Hae Rho, Korea Food Research Institute, San 46-1, Baekhyun-dong, Bundang-ku, Seongnam-si, Kyunggi-do 463-420, Korea  
Tel: 82-31-780-9060  
Fax: 82-31-780-9234  
E-mail: drno@kfri.re.kr

장 및 해동시 식육의 내부 압력의 변화<sup>(4)</sup>에 관한 연구가 알려져 있다. 그러나 대부분의 연구가 냉동저장 동안의 식육의 품질변화<sup>(5-7)</sup>에 대한 것이며, 식육의 수분 상태에 관한 국내의 연구는 미흡한 실정이다. 식육의 수분 상태와 분포에 관한 연구<sup>(8-13)</sup>에서는 NMR의 이용이 보편적이며, 신속하고 비파괴적인 측정과 시료의 재사용이 가능하고 재현성이 높다는 장점으로 인하여 식품분야에서의 NMR의 이용은 계속적으로 증가될 추세이다.

본 연구에서는 냉·해동과정 동안 온도를 단계적으로 변화시키면서 돈육의 NMR 자기완화시간을 측정하고, CONTIN 프로그램을 이용한 CPMG 데이터의 연속 분배 분석(continuous distribution analysis)을 통하여 온도에 따른 근육 내 물의 상태 변화를 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 시료

본 실험에 사용된 돈육(등심)은 도축한 날짜로부터 2일이 경과한 것을 서울과 경기지역의 소매상에서 구입하고 냉장 운반하였으며, 눈에 보이는 지방층을 제거한 후 즉시 실험에 사용하였다. NMR 측정용 시료는 직경 10 mm의 NMR tube에 3 cm 높이로 일정하게 넣은 다음 측정에 사용하였다.

### 단계적 온도 처리

냉동 및 해동 과정 중의 온도처리는  $-30^{\circ}\text{C}$ ~ $20^{\circ}\text{C}$ 까지 온도가 조절되는 수욕(Haake K15, Haake, Germany)을 이용하였고, 냉각수는 ethylene glycol과 ethanol을 1:1(v/v)으로 혼합하여 사용하였다. 측정은 thermo-couple(Fluke 50S thermometer, Fluke, USA)을 이용하여 시료의 내부 온도가 목적 온도에 도달한 후 목적 온도에서 20분간 유지시킨 다음 측정하였다.

### Pulsed $^1\text{H}$ NMR 측정

실험에 이용된 기기는 NMS 120(Bruker GmbH, Germany)으로 20 MHz, 10 VTS(various temperature) probe를 사용하였으며, 시료 튜브의 직경은 10 mm였다. Probe에 연결된 circulator cooling(Haake K15, Haake, Germany)을 사용하여 측정온도를 일정하게 유지하였다. 측정항목은  $90^{\circ}$  pulse를 이용한 SFC(solid fat content)와 spin-lattice relaxation time의 측정법인  $T_1$ -IR(inverse recovery:  $180^{\circ}$ - $\tau$ - $90^{\circ}$  pulse)과  $T_1$ -SR(saturation recovery:  $90^{\circ}$ - $\tau$ - $90^{\circ}$ - $\tau$  pulse), spin-spin relaxation time 측정법인  $T_2$ -SE(spin echo:  $90^{\circ}$ - $\tau$ - $180^{\circ}$  pulse),  $T_2$ -CPMG(Carr-Purcell-Meiboom-Gill method:  $90^{\circ}$ - $\tau$ - $[180^{\circ}$ - $2\tau$ -(echo)]<sub>n</sub> pulse)를 측정하였다.

또한  $T_2$ -CPMG 데이터의 연속 분배 분석(continuous distribution analysis)은 CONTIN package(Bruker GmbH, Germany)를 이용하였다. CPMG의 continuous distribution은 다음 식에 의해 정의하였다.

$$g_i = \sum_{j=1}^m f_j \exp\left(\frac{-t_i}{T_j}\right) \quad (1)$$

$g_i$ : unknown amplitude of the spectral component at  $t_i$

$t_i$ : relaxation time

$f_j$ : pre-exponential multipliers of the distribution

$T_j$ :  $T_2$  values

CONTIN 프로그램은 함수를 최소화하여 (1)의 식을 (2)의 식으로 풀게되어 있다.

$$\left( g_i - \sum_{x=1}^m f_x \exp\left(\frac{-t_i}{T_x}\right) \right)^2 + \lambda \times \sum_{x=1}^m f_x^2 \quad (2)$$

위에서  $\lambda \times \sum_{x=1}^m f_x^2$ 는 0차 정규화를 시행함으로써 문제의 잘못된 조건을 극복하기 위해 식에 더해진 선형조합이다.  $\lambda$ 는 무계 상수로  $\lambda$ 가 증가할수록 스펙트럼이 완만해지며, 낮은  $\lambda$ 를 가질수록 피크가 예리해진다<sup>(14)</sup>.

본 실험에서는 CPMG의 data pairs 550개를 이용하여 CONTIN을 실시하였으며, CONTIN 스펙트럼의 data pairs를 499로 하였다.

### 통계분석

냉동 및 해동 중의 자기완화시간의 변화는 SAS<sup>(15)</sup>를 이용하여 t-test 등으로 결과값들 간의 유의성을 검정하였다.

## 결과 및 고찰

### NMR relaxation time의 변화

냉동 및 해동 과정 중 온도별 고�형 지방의 함량은 Fig. 1과 같다. 본 실험의 고�형 지방 함량은  $90^{\circ}$  펄스 후 free induction decay되는  $^1\text{H}$ (proton)의 신호 중 고체 신호와 액체 신호의 비로 측정되는 직접측정법을 사용하였는데, 어는 점에 해당하는  $-4^{\circ}\text{C}$  부근을 제외하고는 냉동과 해동시 고�형 지방의 함량은 차이를 나타내지 않았다. 이와 같은 결과는 냉동과 해동을 거친 식육에서 육즙 유출로 인한 손실, 보수력 및 연도 등의 물리적 변화는 일어나나 단백질, 지방과 같

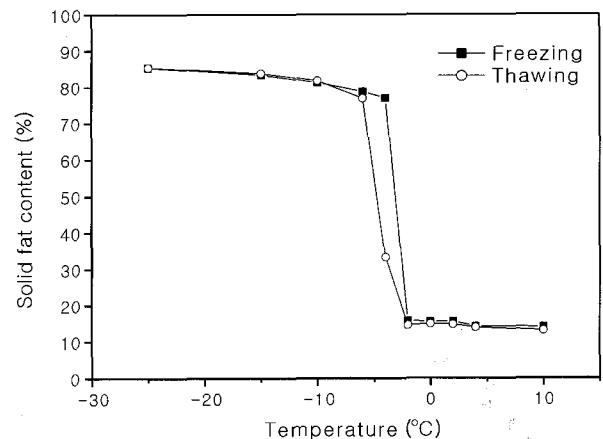


Fig. 1. Changes of solid fat content during freezing and thawing of pork loins.

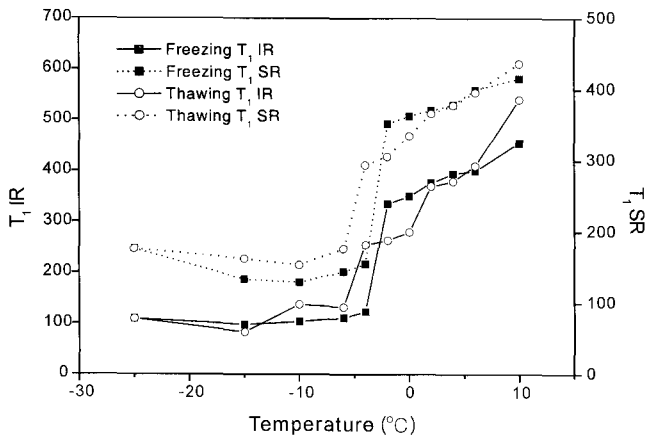


Fig. 2. Spin-lattice relaxation times ( $T_1$ ) during freezing and thawing of pork loins.

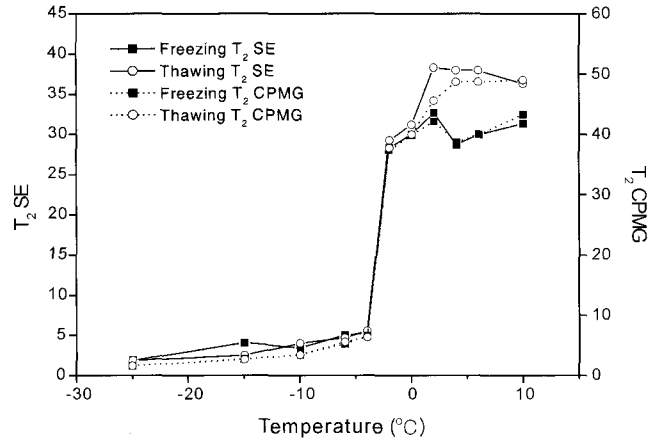


Fig. 3. Spin-spin relaxation times ( $T_2$ ) during freezing and thawing of pork loins.

은 일반성분들의 함량 변화는 일어나지 않는다는 보고<sup>(2)</sup>와도 일치하는 것이며,  $-4^{\circ}\text{C}$  부근에서 냉동, 해동시 다르게 측정된 고흥 지방의 함량은 열전도에 의한 동결 및 해동 속도가 다르기 때문으로 사료된다.  $10\sim-2^{\circ}\text{C}$ 에서 약 15%로 일정하게 측정되던 고흥 지방의 함량은 어는 점을 지나  $-25^{\circ}\text{C}$ 까지 냉동하는 동안 85%까지 증가되었다. 이것은 약 70%의 액상 지방이 얼면서 고흥 지방으로 변화되었으며, 아직 얼지 않은 액체가 남아있다는 것을 의미한다.

자기완화시간을 측정하여 냉·해동 중의 변화를 살펴본 결과는 Fig. 2, 3과 같다. Fig. 2는 spin-lattice relaxation 측정법인  $T_1$ -IR과  $T_1$ -SR을 사용하여 자기완화시간을 측정한 것이다.  $T_1$ -IR과  $T_1$ -SR 모두 온도가 내려갈수록 자기완화시간이 낮아지는 경향을 보였으며, 고흥 지방 함량과 마찬가지로 어는점인  $-4^{\circ}\text{C}$  부근에서 갑작스럽게 자기완화시간이 변화되며, 해동보다는 냉동시 더욱 급격한 변화를 나타내는 것을 알 수 있었다.  $T_1$  자기완화시간이 갖는 의미는 시료 중 물의 운동성(mobility)을 나타내는 것으로 긴  $T_1$  자기완화시간은 높은 운동성을, 짧은  $T_1$  자기완화시간은 느린 운동성을 나타내며, 운동성으로 물의 상태를 추정하였을 때 긴  $T_1$ 은 자유수를, 짧은  $T_1$ 은 결합수를 나타내는 것으로 알려져 있다<sup>(9)</sup>. 냉동과정 중에  $T_1$  자기완화시간이 감소하는 것은 온도에 따라 자유수가 얼면서 신호를 잃어가는 것이며, 낮은 온도에서 나타나는  $T_1$  자기완화시간은 얼지 않는 물의 신호를 의미하는 것이다.

Spin-spin relaxation 측정법인  $T_2$  자기완화시간도  $T_1$ 과 마찬가지로 긴  $T_2$ 는 자유수를, 짧은  $T_2$ 는 단백질 등과 결합되어 얼지 않는 결합수로 정의할 수 있다. Fig. 3은 spin echo 법과 CPMG법을 사용하여 온도별로 측정한  $T_2$  자기완화시간을 나타낸 것이다. Fig. 2와 같이 온도가 낮아질수록  $T_2$  자기완화시간이 감소되었으며,  $-4^{\circ}\text{C}$ 보다 낮은 온도에서는 냉동과 해동시  $T_2$ (ms)의 차이가 나타나지 않았다. 하지만  $-2^{\circ}\text{C}$ 보다 높은 온도 범위에서는 다른 NMR 값과 다르게 냉동과 해동시 다른 자기완화시간을 나타내었다. 신선육을  $10^{\circ}\text{C}$ 부터 감온하는 냉동 과정시  $T_2$ -SE는 28.33~32.67 ms를 나타내었으나, 해동 과정 중에서는 29.27~38.33 ms으로 높게 나타났다.  $T_2$ -CPMG의 결과 또한 냉동시 37.37~43.27 ms이었던  $T_2$ 가 해

동시 승온하는 중에는 37.73~49.07 ms으로 높게 나타났다. 냉동 및 해동시  $T_2$  자기완화시간이 차이가 나는 이유는 냉동시 자유수 뿐 만 아니라 약하게 결합되어 있던 결합수가 만들어 낸 얼음결정이 해동과정 중에서 원래 상태의 물로 돌아가지 못하고, 세포 밖으로 빠져나와 결합수가 자유수로 교환되었기 때문으로 사료된다. 따라서 온도에 따른 물의 상태를 조사하기 위하여  $T_2$  CPMG 데이터의 연속 분배 분석을 수행하였다.

Continuous distribution analysis

단계적으로 감온 또는 승온을 하면서 측정한  $T_2$ -CPMG의 연속 분배 분석으로 얻은 결과는 각각 Fig. 4 및 5와 같다. 연속 분배 분석에 사용한 소프트웨어는 Bruker사에서 제공받은 CONTIN package였으며, 분석 후 얻어진 결과 스펙트럼의 x, y, z축은 각각  $T_2$ (ms), intensity(%)와 온도( $^{\circ}\text{C}$ )였다.  $T_2$ -CPMG의 연속 분배 분석을 통하여 얻어진 피크는  $-2^{\circ}\text{C}$ 이상의 온도에서 2~4개의 피크가 발견되었다. 주성분은 30~45 ms으로 면적이 가장 크게 나타났고, 100 ms 부근에서 나타나는 피크와 1~5 ms의 짧은  $T_2$  자기완화시간, 150~200 ms의 긴  $T_2$  자기완화시간을 갖는 피크가 검출되었다. Borisova 등<sup>(15)</sup>의 보고에서는 돈육 내 수분의 상태를 5개(a, b, c, d, e)로 구분하고, 각각을 15~25 mcs(성분 a), 50~150 mcs(성분 b), 2~6 ms(성분 c), 35~45 ms(성분 d), 150~200 ms(성분 e)라고 하였다. 성분 a는 아주 짧은 자기완화시간을 가지는 actomyosin에 속한 단백질의  $^1\text{H}$ 이며, 성분 b는 아주 적은 양이 검출되고, 근육단백질의  $^1\text{H}$ 과 관계가 있다고 하였다. 성분 c는 강한 결합수, 성분 d는 고정수(immobilized water)로 가장 많은 양이 존재하며, 성분 e가 자유수라고 성질을 정의하였다. 물의 상태를 정의하는 용어는 참고하는 문헌에 따라 다르게 불릴 수 있기 때문에 본 실험에서는 Borisova 등<sup>(16)</sup>이 Belton<sup>(9)</sup>의 이론을 들어 정의한 위의 단어로 물의 상태를 구분하고, 30~45 ms의  $T_2$ 를  $T_m$ (medium  $T_2$ ), 1~6 ms의  $T_2$ 를  $T_s$ (short  $T_2$ ), 100 ms  $T_2$ 를  $T_l$ (long  $T_2$ ), 150~200 ms의  $T_2$ 를  $T_{ll}$ (longest  $T_2$ )로 명명하였다.  $10^{\circ}\text{C}$ 에서 넓은 범위, 넓은 면적으로 나타난 주성분인  $T_m$ 는 온도가 낮아질수록 35~45 ms 범위에 예리한 피크를 나타내었으며,  $-2^{\circ}\text{C}$ 에서 완만한 피크의 형태를 보

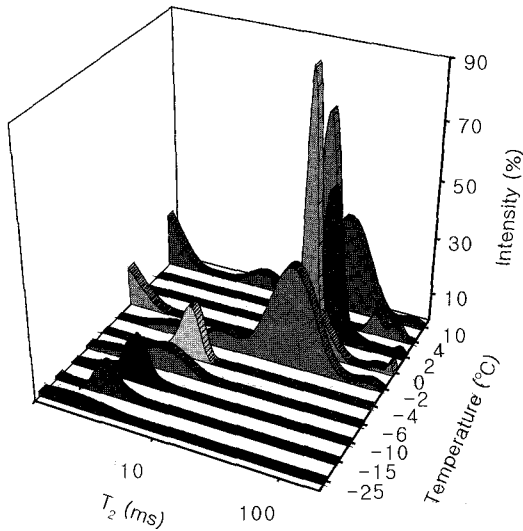


Fig. 4. Continuous distribution analysis of  $T_2$  CPMG relaxation during freezing of pork loins.

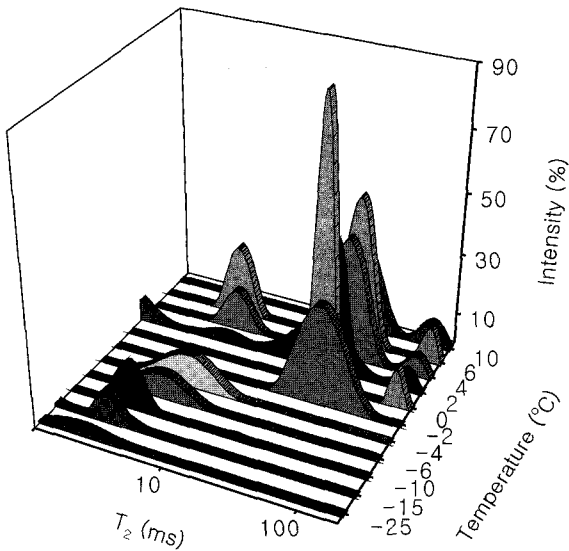


Fig. 5. Continuous distribution analysis of  $T_2$  CPMG relaxation during thawing of pork loins.

이다가 어느점인  $-4^{\circ}\text{C}$ 에서 신호가 사라졌다. 또한  $T_1$ 과  $T_{1\rho}$ 은 매우 적은 양으로 검출되었으며,  $T_{1\rho}$ 과 마찬가지로  $-4^{\circ}\text{C}$  이하에서는 검출되지 않았다. 이는 고정수와 자유수가 얼었다는 것을 의미하며,  $-4^{\circ}\text{C}$  이하에서도 2~6 ms의  $T_s$ 는 계속적으로 신호가 검출되어 단백질과 강하게 결합되어 있는 결합수임을 알 수 있었다.  $-4^{\circ}\text{C}$ 이상에서는 크게 나타나지 않았던  $T_s$ 가  $-4^{\circ}\text{C}$ 이하에서는 주된 피크로 나타나는 것은 온도가 낮아질수록 자유로운 움직임의 'H'들이 주변의 지지체(matrix)의 영향을 받아 상대적으로 움직임이 없는 'H'로 변화되었음을 알 수 있었다. 또한  $T_s$ 의 범위가 온도가 낮아질수록 좌측으로 이동하여  $T_2$ 가 점점 짧아지고, 피크의 면적이 좁아지다가  $-25^{\circ}\text{C}$ 에서는 더 이상 CONTIN package에 의하여 계산되지 않는 피크가 되었다.

$-25^{\circ}\text{C}$ 로 냉동되었던 돈육을 다시 단계적으로 승온시키면

서 측정된  $T_2$  CPMG의 CONTIN 데이터 분석 결과는 Fig. 5와 같다. 냉동시의 마찬가지로  $-25\sim-4^{\circ}\text{C}$ 에서는  $T_s$ 만이 검출되었고, 온도가 상승될수록 피크의 면적과 범위 또한 넓어지는 것을 알 수 있었다.  $-2^{\circ}\text{C}$ 로 온도가 상승되었을 때에는  $T_s$ 는 검출되지 않고, 넓은 범위의  $T_{1\rho}$ 만이 검출되었으며,  $0^{\circ}\text{C}$ 부터는  $T_1$ 이 검출되기 시작하였다. 냉동 중의  $T_1$  및  $T_{1\rho}$ 의 면적보다 해동시의 면적이 뚜렷하게 넓어졌음을 알 수 있으며, 예리했던  $T_{1\rho}$  피크도 완만해지는 것이 관찰되었다. 이와 같은 이유는 결합수와 고정수가 형성했던 얼음 결정이 해동시 원상태로 복원되지 못하고 세포 밖으로 유출되어 육즙 유출을 일으켰기 때문으로 사료된다. 본 실험에서는 단계적인 승온을 통하여 해동시 근육내의 물의 상태를 관찰한 것으로 일반적인 완만 해동을 사용했기 때문에 앞으로 냉동 및 해동 속도를 조절하여 급속 및 완만 냉·해동시 물의 상태변화를 조사하고, 물리적인 변화를 최소화시킬 수 있는 방법에 대한 좀 더 체계적인 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

## 요 약

냉동 및 해동과정 중의 돈육의 NMR 자기완화시간의 변화를 측정하고,  $T_2$  CPMG 데이터의 연속 분배 분석을 통하여 근육 내 물의 상태 변화를 조사하였다. 고흡 지방 함량은 온도가 낮아질수록 약간 증가하는 경향을 보였으나, 어느점인  $-4^{\circ}\text{C}$ 에서 급격하게 증가되어  $-25^{\circ}\text{C}$ 에서 85%의 고흡 지방 함량을 나타내었다. 이와 반대로 자기완화시간은 온도가 낮아질수록 감소하는 경향을 보여, 온도에 따라 물의 상태가 변화하여 얼음 결정을 형성하는 것을 알 수 있었다. 특히  $T_2$  자기완화시간은 냉동보다 해동시의  $T_2$ 가 더 높게 나타나 형성되었던 얼음 결정이 녹으면서 원래 상태로 복원되지 않고 육즙 유출을 형성하였음을 예상할 수 있었다. 따라서  $T_2$  CPMG 데이터의 연속 분배 분석을 수행하여 온도에 따른 물의 상태 변화를 조사하였다. 주성분은 30~45 ms의  $T_2$ 로 온도가 낮아질수록 함량이 감소하였으며,  $-4^{\circ}\text{C}$  이하에서는 검출되지 않았다.  $-4^{\circ}\text{C}$  이하에서는  $T_s$ 만이 검출되었고, 피크의 크기는 온도가 낮아질수록 감소되어  $-25^{\circ}\text{C}$ 에서는 아무런 피크도 나타나지 않았다. 해동 중의  $T_2$  성분의 변화는  $-4^{\circ}\text{C}$  이하에서는 냉동과정과 마찬가지로  $T_s$  1개의 피크만이 검출되었고,  $-4^{\circ}\text{C}$ 이상으로 단계적으로 승온하는 과정에서 냉동시보다  $T_{1\rho}$ 과  $T_1$ 의 면적이 더 넓게 나타나, 냉동과 해동과정을 거치면서 결합수와 자유수간의 상태 변화가 일어났음을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-1999-000-0018-0)지원으로 수행된 것으로 지원에 감사드립니다.

## 문 헌

1. Ministry of Agriculture and Forestry. Statistical Yearbook. Ministry of Agriculture and Forestry, Seoul (2001)
2. Hamm, R. Biochemistry of meat hydration. Adv. Food Res. 10: 355-463 (1960)

3. Song, M.S. and Lee, S.J. Effect of freezing/thawing cycles on physical properties of beef. *Food Eng. Prog.* 6: 101-108 (2002)
4. Jeong, J.W. and Kim, J.H. Changes of internal pressure during freezing, frozen storage and thawing of meats. *Korean J. Food Sci. Technol.* 31: 682-687 (1999)
5. Jeong, J.W., Lee, H.J. and Park, N.H. Changes in quality during frozen storage of meat with thermal equalized freezing. *Korean J. Food Sci. Technol.* 31: 688-696 (1999)
6. Otremba, M.M., Dikeman, M.E. and Boyle, E.A.E. Refrigerated shelf life of vacuum-packaged, previously frozen ostrich meat. *Meat Sci.* 52: 279-283 (1999)
7. Kim, C.J., Suck, J.S., Ko, W.S. and Lee, E.S. Studies on the cold and frozen storage for the production of high quality meat of Korean native cattle. *Korean J. Food Sci. Resour.* 14: 155-158 (1994)
8. Lee, J.R., Baianu, I.O. and Bechtel, P.J. Hydration behavior of heart muscle studied by nuclear magnetic relaxation. Changes with heat treatment in muscle hydration and water distribution in heart muscle. *J. Agric. Food Chem.* 40: 2350-2355 (1992)
9. Belton, P.S., Jackson, R.R. and Packer, K.J. Pulsed NMR studies of water in striated muscle. I. Transverse nuclear spin relaxation times and freezing effects. *Biochim. Biophys. Acta.* 286: 16-25 (1972)
10. Bertram, H.C., Karlsson, A.H., Aasmussen, M., Pedersen, O.D., Donstrup, S. and Andersen, H.J. Origin of multiexponential  $T_2$  relaxation in muscle myowater. *J. Agric. Food Chem.* 49: 3092-3100 (2001)
11. Lee, J.R. and Baianu, I.C. Hydration behavior heart muscle studies by nuclear magnetic relaxation: Deuterium exchange of water protons in myocardium. *Macromol. Symp.* 140: 245-261 (1999)
12. Rho, J.H. Water distribution in chicken heart muscle studied by proton, deuterium and oxygen-17 nuclear magnetic resonance. *Food Sci. Biotechnol.* 6: 270-277 (1997)
13. Rho, J.H. Hydration behavior and physicochemical properties of potato starch studied by proton nuclear magnetic resonance. *Food Sci. Biotechnol.* 6: 278-285 (1997)
14. Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. and Flannery, B.P. Integral equations and inverse theory. pp. 779-817. In: *Numerical Recipes in Fortran*. 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK (1992)
15. SAS Institute, Inc. SAS User's Guide. 5th ed. Statistical Analysis System Institute, Cary, NC, USA (1985)
16. Borisova, M.A. and Oreshkin, E.F. On the water condition in pork meat. *Meat Sci.* 31: 257-265 (1992)

---

(2002년 8월 5일 접수; 2003년 2월 5일 채택)